

Copyright © 2020 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
 Russian Journal of Astrophysical Research. Series A
 Has been issued since 2015.
 E-ISSN: 2413-7499
 2020, 6(1): 35-45

DOI: 10.13187/rjar.2020.1.35
www.ejournal28.com



Determining the Coordinates of Points on the Surface of a Space Body

Sergey V. Shaytura ^{a, b, c, d, e, *}

^a Russian University of Transport (MIIT), Russian Federation

^b International Academy of Informatization, Russian Federation

^c Russian Academy of Cosmonautics. E.K. Tsiolkovsky, Russian Federation

^d International Academy of Sciences of Pedagogical Education, Russian Federation

^e Institute of Humanities, Economics and Information Technologies, Burgas, Bulgaria

Abstract

The article examines the method and algorithm for determining the coordinates of points on the surface of a space body. The article introduces a generalized concept of a cosmic body. This concept includes: planets, planetary satellites, asteroids, comets, small celestial bodies. The survey is carried out from the board of a spacecraft moving past a space body. The trajectory of the spacecraft is considered flat and not perturbed. Rotating the camera creates an overlap area for a pair of photos. Determination of the coordinates of points on the surface of a space body is carried out by photographs. To solve the problem, inertial determination of the coordinates of the spacecraft and rotation of the camera through a known angle are required. The direct photogrammetric intersection is solved under the condition of equality of scales. The non-coplanarity of the vectors defining the position of the point on the surface and the space body is allowed. The method is applicable to determine the coordinates of points on the surface of the Earth and on the surface of other planets.

Keywords: space body, coordinates of surface points, orbit, spacecraft, photography, straight intersection.

1. Введение

Введем понятие космическое тело как обобщенное понятие для космических объектов: планет, спутников планет, астероидов, комет и малых небесных тел. Задача определения геометрических параметров космических тел существует в геодезической астрономии (Gospodinov, 2018), в небесной механике (Яшкин, 2014), в космической геоинформатике (Bondur, Tsvetkov, 2015), в космической геодезии (Calonico et al., 2019, Oznamets, Tsvetkov, 2019), в сравнительной планетологии (Tsvetkov, 2018; Kudzh, Tsvetkov, 2020) и других направлениях. При исследовании космических тел возникают разные задачи. В одних случаях требуется определить сечение космического тела. Эта задача встречается при изучении комет (Tsvetkov, 2017). В других случаях требуется определить динамику движения объекта (Яшкин, 2014). Существует задача определения точек на поверхности тела и формы этой поверхности (Manned Mission to Mars, 2006; Савиных, Цветков, 2001). На произвольном космическом теле, как правило, нет точек с известными координатами, которые называют опорными точками. Ситуация с наличием опорных точек встречается

* Corresponding author

E-mail addresses: swshaytura@gmail.com (S.V. Shaytura)

только в наземной съемке и в аэрофотосъемке поверхности Земли. Большинство методов фотограмметрии используют это условие. Для обработки космических снимков также существуют методики, применяющие опорные точки на поверхности (Бугаевский, Портнов, 1984; Урмаев, 1989). Такие методы обработки космических снимков применимы только для обработки снимков поверхности Земли, полученных из космоса. Данная статья исследует метод расчета координат точек на поверхности космического тела, по снимкам, получаемым при помощи фотограмметрической аппаратуры с отсутствием на поверхности космических тел опорных точек.

2. Обсуждение и результаты

Две ситуации съемки космического тела с космического носителя

Существуют две качественно разные ситуации съемки космического тела с космического аппарата или космического носителя съемочной аппаратуры. Первая ситуация характерна для искусственных спутников Земли. При движении космического аппарата (КА) или космического носителя (КН) аппаратуры по орбите спутника планеты возникает ситуация, приведенная на [Рисунке 1](#) (Tsvetkov, 2011; Бармин и др., 2013). На [Рисунке 1](#) символами «Т» обозначены точки орбиты космического аппарата, в которых инерциальное или иное позиционное устройство определяет координаты траектории КН.

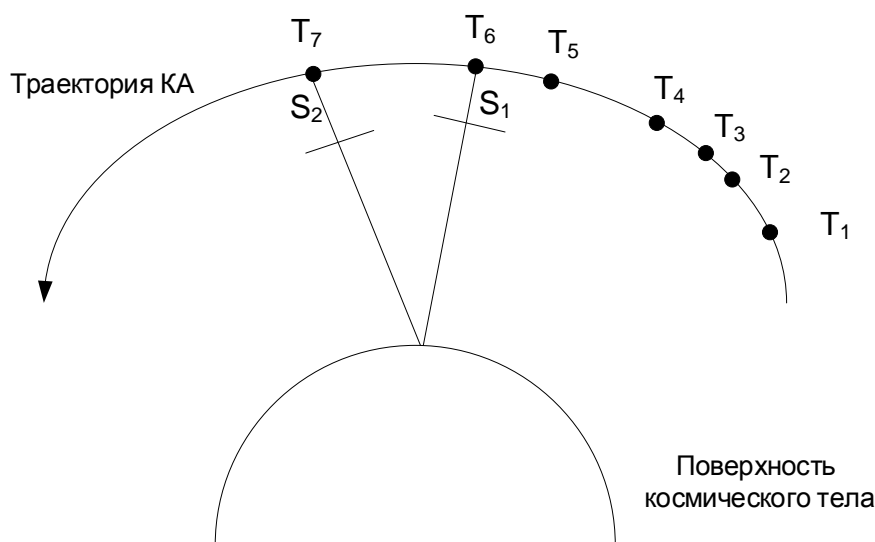


Рис. 1. Движение космического аппарата по орбите спутника

Первая ситуация съемки космического тела ([Рисунок 1](#)) характерна тем, что траектория движения КН близка к эллиптической или круговой. В этом случае можно говорить о замкнутой орбите, которая позволяет делать многократные съемки поверхности космического тела. Набор точек «Т» с известными координатами позволяет вычислить невозмущенную траекторию такой траектории или орбиты. На [Рисунке 1](#) символами S_1 , S_2 – обозначены условно две точки фотографирования с борта КН поверхности космического тела. Принципиально любая известная точка траектории может служить точкой фотографирования. Это является одним из условий применения данного метода при съемке из космического пространства. Координаты точек S_1 , S_2 должны быть известны в относительной или внешней системе координат. Сплошными линиями на рис.1 показаны главные оптические оси фотокамер. Они являются биссектрисами угловой зоны фотограмметрической аппаратуры или оптической аппаратуры. Если оптические оси пересекаются в точке на поверхности космического тела, то частично пересекаются угловые зоны съемки для фотограмметрии или наблюдения для оптики. При пересечении зон съемки возникает область перекрытия на паре снимков и становится возможным стереоскопическое вычисление пространственных координат на поверхности такого

космического тела. При движении космического аппарата не по орбите спутника, а мимо космического тела, может возникнуть вторая ситуация съемки, приведенная на [Рисунке 2](#).

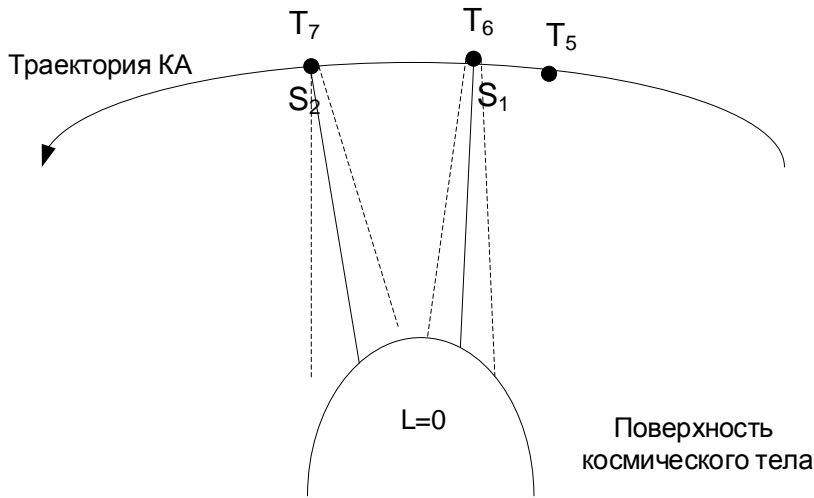


Рис. 2. Ситуация движения КА мимо космического тела

Для второй ситуации на [Рисунке 2](#) космический носитель или космический аппарат приближается к поверхности космического тела и затем удаляется от нее. На [Рисунке 2](#) символами S_1, S_2 – обозначены две точки фотографирования поверхности космического тела с траектории космического носителя. Сплошными линиями на рис.2, как и на [Рисунке 1](#) показаны главные оптические оси фотокамер или оптических приборов. Для [Рисунка 2](#) оптические оси не пересекаются на поверхности космического тела. Это влечет то, что могут не пересекаться и угловые зоны съемки. Область перекрытия снимков или зон наблюдения ($L = 0$, [Рисунок 2](#)) для этой ситуации отсутствует. Поэтому для такой ситуации нельзя рассчитать пространственные координаты точек поверхности космического тела по паре снимков. Можно делать расчеты по каждому снимку независимо, но только при наличии опорных точек.

Если съемочная система имеет возможность поворота на известный угол, то, как альтернатива ситуации на [Рисунке 2](#) возникает ситуация, приведенная на [Рисунке 3](#).

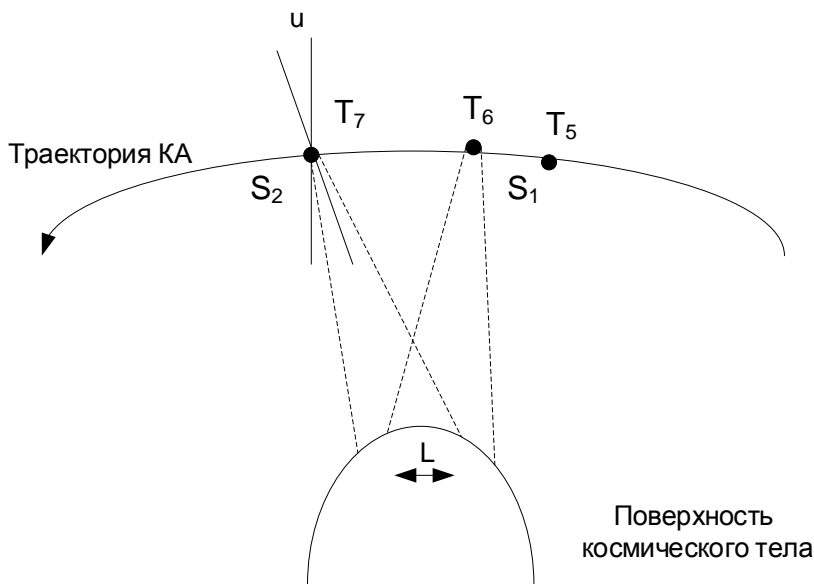


Рис. 3. Съемка при наличии зоны перекрытия на поверхности космического тела

На [Рисунке 3](#) символами S_1 , S_2 , как и на [Рисунке 2](#), обозначены точки фотографирования из космоса поверхности космического тела. Сплошными линиями на [Рисунке 3](#), также как и на [Рисунке 2](#), показаны главные оптические оси фотокамер. Величина u показывает угол поворота камеры во второй точке съемки S_2 . Для рис.3 область перекрытия L отлична от нуля и возникает возможность определения пространственных координат в этой зоне перекрытия за счет появления стереоскопического эффекта.

Важный вывод: наличие механизма поворота камеры на КН создает возможность получения зоны перекрытия снимков на поверхности космического тела мимо которого пролетает КА. Создание зоны перекрытия снимков на поверхности космического тела при известном базисе фотографирования дает возможность определения координат точек на поверхности космического тела в относительной системе координат, связанной с траекторией носителя. Однако этот метод позволяет получить реальные размеры поверхности и объектов на этой поверхности.

Анализ условий съемки и методика расчета

Концепции метода приведены в ([Barmin i dr., 2014](#)). Методика съемки и вычислений включает следующие начальные условия. При съемке используют две системы координат. Внутренняя система координат связана с конфигурацией КН. Внешняя или относительная система координат связан с траекторией КН и возможностью относительного измерения точек на траектории. Космический носитель должен иметь минимум два устройства: фотограмметрическое устройство (или оптическое устройство) для измерения на поверхности космического тела и устройство для относительного измерения координат траектории или орбиты. Фотограмметрическое устройство в начальном состоянии (S_1 , [Рисунок 3](#)) координировано относительно КН во внутренней системе координат. Ставится задача по двум и более снимкам получить координаты точек поверхности космического объекта (планета, астероид, комета) во внешней системе координат. Фотограмметрическое устройство допускает поворот на известный или задаваемый угол в плоскости траектории ([Рисунок 3](#)). Траектория считается не возмущенной и описывается кривой второго порядка. Это важное ограничительное условие применения данной методики. Методика съемки и вычислений включает последовательные этапы.

1. Расчет траектории КН по точкам, с измеренными координатами с помощью инерциального устройства. В этом случае требуется достаточное количество точек для определения либо уравнения траектории, либо экстраполяции не возмущенной траектории по точкам.

2. Второй этап. Расчет координат точек траектории, в которых производится съемка, в относительной системе координат, связанной с траекторией КН, а не с космическим телом. Строго говоря, точки траектории T и точки съемки S не совпадают и между ними существует вычисляемое смещение. Точки траектории рассчитываются для центра масс КН, а точки съемки связаны с передней узловой точкой съемочной аппаратуры, которая, как правило, не совпадает с центром масс КН или КА. Таким образом, при известных точках T требуется пересчет координат для точек S .

3. Третий этап. Выполнение съемки в первой точке S_1 при начальном положении фотограмметрического устройства, ориентированном во внутренней системе координат КН. При этом искомая точка поверхности или область поверхности, или объект на поверхности попадают в информационное поле снимка.

4. Четвертый этап. Перемещение по орбите в другую точку съемки S_2 , координаты которой определены относительно точки S_1 . При этом пространственные координаты точек S_2 , S_1 задают базис съемки и задают внешнюю систему координат, в которой определяются точки поверхности космического тела. Следует подчеркнуть, что определение координат поверхности космического тела осуществляется не в его собственной (неизвестной для наблюдателя) системе координат, а во внешней системе координат, связанной с траекторией КН. Полным аналогом служит определение координат точек на поверхности Земли с помощью систем ГНСС. Координаты точек земной поверхности в этой системе определяют относительно орбит спутников. Привязка координат к земной поверхности осуществляется путем создания и использования базовых станций на земной поверхности. За счет этого повышается точность измерений координат. Для космического тела базовые станции чаще

всего установить невозможно, поэтому его координаты рассчитывают относительно траектории КН.

5. На следующем пятом этапе вручную или с помощью автоматики в точке S_2 выполняют наклон фотограмметрического устройства в плоскости траектории таким образом, чтобы первоначально сфотографированная точка или область поверхности попала в сектор обзора фотограмметрического устройства. На языке аэрофотосъемки это соответствует созданию зоны перекрытия на паре снимков. Различие состоит в том, что аэрофотосъемка выполняется практически в горизонтальной плоскости относительно поверхности Земли с использованием гироскопических устройств, а в космических условиях съемка выполняется с криволинейной орбиты с использованием инерциальных или иных измерительных устройств.

6. На шестом этапе выполняют съемку того же участка поверхности из точки S_2 при новом положении фотограмметрического устройства.

7. На седьмом этапе решают важную задачу идентификации изображений точек поверхности на разных снимках.

8. Восьмой этап. После идентификации изображений измеряют пары координат на снимках, соответствующие общим точкам на поверхности космического тела.

9. На девятом этапе производят расчет пространственных координат точки поверхности по измеренным координатам изображения этой точки на снимке и известном базисе S_2, S_1 .

10. Десятый этап. Процедуру расчета выполняют для всех точек на перекрывающейся области снимков, координаты которых необходимо вычислить.

11. Одиннадцатый этап. По совокупности вычисленных точек строят модель фрагмента поверхности космического объекта. При этом чаще всего используют триангуляционный подход.

Определение координат точек траектории космического носителя можно выполнять разными методами инструментальным и аналитическим. Один из методов описан в работе (Barmin i dr., 2014) и в данной статье рассматривать эту процедуру не будем.

Определение пространственных координат поверхности космического тела

Существуют разные подходы к определению координат точек поверхности. Принципиальным является использование модели взаимного ориентирования, когда строится модель без привязки к поверхности и последующей, если возможно привязкой модели к реальным координатам по известным пространственным точкам поверхности. Существует другой метод определения координат за счет прямой засечки при известном базисе съемки. Второй метод предпочтительнее для КН.

Для этого метода съемочная камера ориентирована во внутренней системе координат на КА. Она имеет возможность поворота в направлении движения КН на заданный угол. Этот угол определяется во внутренней системе координат КН. Направление оптической оси камеры в точках траектории T_6 и T_7 или точках съемки S_1, S_2 как различается только направлением оптической оси фотограмметрического устройства. Элементы внутреннего ориентирования в точках S_1, S_2 не меняются, поскольку камера одна. Элементы внешнего ориентирования в точках S_1, S_2 отличаются углом поворота u и координатами точек съемки. Основой расчетов пространственных координат произвольной точки на поверхности является решение прямой засечки (Цветков, Хлебникова, 1987). На Рисунке 4 приведена схема построения координат точки M .

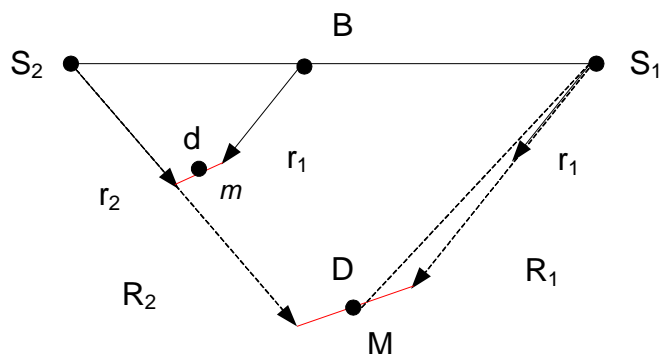


Рис. 4. Определение координат под условием равенства масштабов

На **Рисунке 4** приведены следующие обозначения: S_1, S_2 – точки фотографирования с известными координатами во внешней относительной системе координат; B – пространственный базис съемки, который рассчитывается на основе разности координат точек S_1, S_2 ; M – искомая точка на поверхности космического тела, координаты которой необходимо вычислить; r_1, r_2 , – радиус-векторы в пространстве фотограмметрической модели, направленные в точку модели m по координатам снимков; R_1, R_2 – пространственные вектора направленные в точку M и коллинеарные векторам r_1, r_2 , Условие коллинеарности между R_1, R_2 и r_1, r_2 , выполняется всегда. Точка модели m в пространстве модели является информационным соответствием точки M в реальном пространстве.

В силу погрешностей измерений координат точек снимков вектора r_1, r_2 , формально направленные в точку модели m могут лежать в разных плоскостях. Это означает, что условие компланарности векторов r_1, r_2 , и соответственно векторов R_1, R_2 может нарушаться. При нарушении компланарности векторов r_1, r_2 , их соединяет вектор d в пространстве модели. Этому вектору в соответствие ставиться вектор D в реальном пространстве. Вектора модели r_1, r_2 вычисляются по координатам изображений точек снимков и элементам ориентирования в точках: S_1, S_2 .

В геометрии известно, что вектор d – коллинеарен векторному произведению r_1, r_2 . Это дает основание определить его через векторное произведение этих векторов, умноженное на неизвестный коэффициент N_3 . Из рисунка 4 следует векторное уравнение

$$R_1 + R_2 + D = B. \quad (1)$$

При переходе от векторного уравнения во внешней системе координат к векторам r_1, r_2, d во внутренней системе координат получаем трансформированное выражение (2).

$$N_1 \times r_1 + N_2 \times r_2 + N_3 \times d = B, \quad (2)$$

В выражении (2) N_1, N_2, N_3 – масштабные коллинеарные коэффициенты; B – внешний известный базис. Векторное выражение (2) связывает внутреннюю систему координат снимков с внешней системой координат траектории. Оно дает линейную систему трех уравнений для трех неизвестных N_1, N_2, N_3 . После определения коэффициентов коллинеарности можно вычислить коллинеарные вектора в реальном пространстве R_1, R_2, D . Определение координат точки на поверхности космического тела происходит согласно схеме на рис.4 и приведено в выражении (3).

$$R = N_1 \times r_1 + p \times d + R_1, \quad (3)$$

В выражении (3) новым неизвестным и определяемой величиной является p – весовой коэффициент. Весовой коэффициент может быть определен разными эвристическими методами. Одним из принципов его определения является близость точки M к короткому вектору. В этом случае вес определяется как отношение длины проектирующего вектора к сумме длин векторов в реальном пространстве. Если эти вектора равны, то $p = 1/2$. Это означает, что точка M находится на середине отрезка D . При различии длин векторов R_1, R_2 , точка M смещается в сторону короткого вектора. В итоге вычисляются R_1, R_2, D и M . Величина D может служить основой оценки погрешности вычислений в реальном пространстве (Цветков, Хлебникова, 1987).

Определение пространственных форм

Для моделирования крупных космических тел, форма и поверхность которых близка к регулярной, часто в качестве эталонной модели используют правильные геометрические фигуры типа сфера или эллипсоид. Затем вводят поправки в нерегулярность фигуры. После построения фигуры космического тела делают развертки фигуры на плоскость, используя конус, плоскость или цилиндр. Если ведется съемка части поверхности, то такой метод не применим в принципе. В этом случае можно моделировать только часть поверхности небесного тела в виде пространственной модели. Описанный выше метод позволяет решать задачу моделирования части поверхности небесного тела в виде пространственной модели. Если выполнена съемка всего космического тела – полный облет, то можно смоделировать замкнутую модель такого тела, а не только часть поверхности. Использование метода триангуляции (метод Вороного-Делоне) позволяет строить любые поверхности без привязки космического тела к идеальной геометрической фигуре (Рисунок 5).

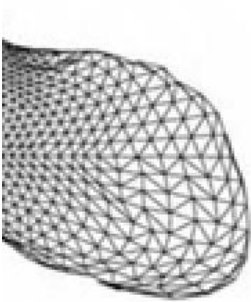


Рис. 5. Фрагмент поверхности космического тела в виде триангуляционной сети

При этом возникают проблемы построения развертки такого тела и его модели. Эта задача ожидает решения в будущем. Развертка нужна в первую очередь для картографов, которые привыкли отражать пространственные тела (в первую очередь поверхность Земли) в виде плоских картографических произведений. Это обусловлено тем, что картографы сотни лет не использовали компьютеры и не привыкли работать с пространственными моделями. Современные возможности вычислительной техники позволяют создавать пространственные трехмерные модели любых объектов, не требуя построения их развертки. Картографический метод исследования – это двухмерный метод исследования трехмерной реальности. Такой подход в современном мире выглядит анахронизмом. Он уступает современным методам построения трехмерной реальности, виртуальной реальности и дополненной реальности. Функции визуальной репрезентации космических объектов выполняет фотограмметрический метод наблюдений. Например, космические изображения спутника Марса Фобоса с «Викинг Орбитер» были получены в течение нескольких сеансов съемки на расстоянии около 5000 км. Снимки позволили также определить сеть пространственных точек поверхности спутника стереоскопически (Duxbury, Callaghan, 1989). На Рисунке 6 приведено фото Фобоса.

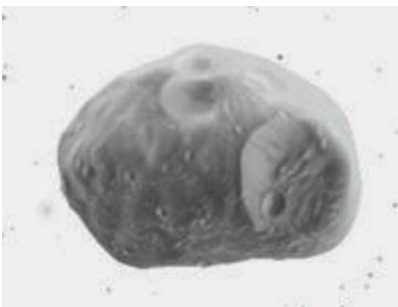


Рис. 6. Фото спутника Марса Фобоса

Данный метод является аналогом, описанного в настоящей статье. По результатам пространственного анализа был вычислен средний радиус Фобоса, который составил $11,03 \pm 0,1$ км и его объём 5621 ± 154 км³ (Duxbury, Callaghan, 1989). Использование методики применения эталонных тел для аппроксимации пространственных тел позволяет проводить построение пространственных моделей космических тел, одна из которых приведена на Рисунке 7.

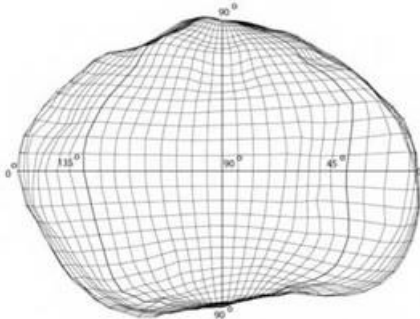


Рис. 7. Вид полумодели спутника Марса Фобоса (Nyrtsov et al., 2000)

Такой подход есть упрощение реальной фигуры путем сведения ее к эталонной. Как визуальная модель она имеет право на существование, но как реальность содержит существенные геометрические ошибки. Эти ошибки тем значимее, чем больше реальная форма космического тела отличается от геометрически правильной формы или комбинации таких правильных форм.

3. Заключение

Сущность подхода данной работе основана на создании внутренней системы координат и привязке ее к внешней системе координат на основе баллистических измерений. Существуют два подхода к построению моделей поверхностей космических тел. Первый подход основан на картографическом методе, в основе которого положен выбор эталонной фигуры, эталонной развертки и последующее построение картографической модели поверхности тела. Другой подход основан на построении геодезической сети на поверхности тела как пространственной реальности. Изложенный в данной статье метод использует второй подход и практически дает строить геодезические фотограмметрические сети на поверхности любого космического тела. Он имеет преимущество при изучении динамики и движения космических тел, так как задает реальные, а не редуцированные параметры тела. Он позволяет формировать более точные модели фигур космических тел особенно в аспекте расчета их центра масс. Точные модели фигур космических тел, сближающихся с Землей, позволяют оценивать динамику их движения и выполнять анализ опасности столкновения этих тел с Землей (Tsvetkov, 2016; Shustov, 2010; Shustov, 2019). Модели фигур космических тел могут быть получены фотограмметрическими наблюдениями и измерениями с помощью разных методов, один из которых предложен в настоящей статье. Метод описанный в данной статье является альтернативой классической фотограмметрии. Классическая фотограмметрия не работает с не копланарными моделями. Информация о форме космического тела используется для исследования распределения гравитации. Она также позволяет проводить исследование эффектов столкновений (Nicolls, McKnight, 2019) в различных режимах состояния вращения. Фотограмметрические исследования космического тела позволяют определить множество его характеристик. Для решения поставленной задачи применено новое решение прямой пространственной засечки.

Литература

Бармин и др., 2013 – Бармин И.В., Савиных В.П., Цветков В.Я. Дистанционный метод определения координат точек на поверхности планеты // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. 3: 26-29.

- Бугаевский, Портнов, 1984 – Бугаевский Л.М., Портнов А.М. Теория одиночных космических снимков. Москва. Недра, 1984. 280 с.
- Савиных, Цветков, 2001 – Савиных В.П., Цветков В.Я. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования, Москва, Картоцентр-Геодезиздат, 2001. 224 с.
- Урмаев, 1989 – Урмаев М.С. Космическая фотограмметрия: учебник для вузов. Москва, Недра, 1989. 279 с.
- Цветков, Хлебникова, 1987 – Цветков В.Я., Хлебникова Т.А. Исследование прямой фотограмметрической засечки // *Геодезия и картография*. 1987. 2: 48-51.
- Яшкин, 2014 – Яшкин С.Н. Небесная механика: учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2014.
- Barmin et al., 2014 – Barmin I.V., Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. (2014). Remote Method of Determining the Coordinates of Points on a Planetary Surface. *Solar System Research*. 2014. Vol. 48 (7): 493-496. DOI: 10.1134/S0038094614070028
- Bondur, Tsvetkov, 2015 – Bondur V.G., Tsvetkov V.Ya. New Scientific Direction of Space Geoinformatics // *European Journal of Technology and Design*. 2015. 4(10): 118-126.
- Calonico et al., 2019 – Calonico D., Clivati C., Mura A., Levi F., de Cumis M.S., Amato L.S., ... & Maddaloni P. A Coherent Fibre Link for Space Geodesy. In *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)* (pp. 1-2). IEEE, 2019.
- Duxbury, Callaghan, 1989 – Duxbury T.C., Callaghan J.D. Phobos and Deimos control networks // *Icarus* 77. 1989. Pp. 275-286.
- Gospodinov, 2018 – Gospodinov S.G. The Development of Geodesic Astronomy // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2018. 4(1): 9-33.
- Kudzh, Tsvetkov, 2020 – Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Triadic comparative analysis *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue*. 2020. No. 10, June, 745-754. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcs.spl.10/2020.06.00047>
- Manned Mission to Mars, 2006 – Manned Mission to Mars. Edited by A.S. Koroteev. М.: Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, 2006. 320 p.
- Nyrtsov et al., 2000 – Nyrtsov M.V., Bugaevskiy L.M. Shingareva K.B. (2000). Mathematical. Basis for non-spherical celestial bodies maps // *Journal of Geospatial Science and Engineering, Hong Kong*. Vol. 2, № 2, pp. 45-50.
- Oznamets, Tsvetkov, 2019 – Oznamets V.V. Tsvetkov V.Ya. Space Geodesy of Small Celestial Bodies // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2019. 5(1): 30-40.
- Shustov, 2010 – Shustov B.M. On coordinated approach to the problem of asteroid-comet impact hazard // *Cosmic Research*, 2010. 48(5): 378-391.
- Shustov, 2019 – Shustov B.M. The Role of Science in the Study and Prevention of Space Hazards // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. 89(4): 311-324.
- Tsvetkov, 2011 – Tsvetkov V.Ya. Principles of measurement of surfaces of extra-terrestrial territories // *International journal of applied and fundamental research*. 2011. 10: 14.
- Tsvetkov, 2016 – Tsvetkov V.Ya. The Problem of Asteroid-Comet Danger // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2016. 1 (2): 33-40.
- Tsvetkov, 2017 – Tsvetkov V.Ya. Application of Monte Carlo Method for Calculation of the Comets' Area by the Photographic Pictures // *Modeling of Artificial Intelligence*. 2017. 4(2): 96-101.
- Tsvetkov, 2018 – Tsvetkov V.Ya. The Development of the Direction "Comparative Planetology" // *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A*. 2018. 4(1): 34-41.

References

- Barmin et al., 2014 – Barmin I.V., Savinykh, V.P., Tsvetkov V.Ya. (2014). Remote Method of Determining the Coordinates of Points on a Planetary Surface. *Solar System Research*. Vol. 48 (7): 493-496. DOI: 10.1134/S0038094614070028
- Barmin i dr., 2013 – Barmin, I.V., Savinykh, V.P., Tsvetkov, V.Ya. (2013). Distantionnyi metod opredeleniya koordinat toчек na poverkhnosti planety [Remote method for determining the coordinates of points on the planet's surface]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*. 3: 26-29. [in Russian]
- Bondur, Tsvetkov, 2015 – Bondur, V.G., Tsvetkov, V.Ya. (2015). New Scientific Direction of Space Geoinformatics. *European Journal of Technology and Design*. 4(10): 118-126.

- Bugaevskii, Portnov, 1984 – Bugaevskii, L.M., Portnov, A.M. (1984). Teoriya odinochnykh kosmicheskikh snimkov [The theory of single satellite images.]. Moskva, Nedra, 280 p. [in Russian]
- Calonico et al., 2019 – Calonico, D., Clivati, C., Mura, A., Levi, F., de Cumis, M. S., Amato, L. S., ... & Maddaloni, P. (2019, April). A Coherent Fibre Link for Space Geodesy. *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)* (pp. 1-2). IEEE.
- Duxbury, Callaghan, 1989 – Duxbury, T.C., Callaghan, J.D. (1989). Phobos and Deimos control networks. *Icarus* 77, 275-286.
- Gospodinov, 2018 – Gospodinov, S.G. (2018). The Development of Geodesic Astronomy. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A.* 4(1): 9-33.
- Kudzh, Tsvetkov, 2020 – Kudzh, S.A., Tsvetkov, V.Ya. (2020). Triadic comparative analysis *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. Special Issue.* No. 10, June, 745-754. DOI: <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.10/2020.06.00047>
- Manned Mission to Mars, 2006 – Manned Mission to Mars. Edited by A.S. Koroteev. M.: Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, 320 p.
- Nyrtsov et al., 2000 – Nyrtsov M.V., Bugaevskiy, L.M., Shingareva, K.B. (2000). Mathematical. Basis for non-spherical celestial bodies maps. *Journal of Geospatial Science and Engineering, Hong Kong.* Vol. 2, № 2. Pp. 45-50.
- Oznamets, Tsvetkov, 2019 – Oznamets, V.V., Tsvetkov, V.Ya. (2019). Space Geodesy of Small Celestial Bodies. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A.* 5(1): 30-40.
- Savinykh, Tsvetkov, 2001 – Savinykh, V.P., Tsvetkov, V.Ya. (2001). Geoinformatsionnyi analiz dannykh distantsionnogo zondirovaniya [Geoinformation analysis of remote sensing data]. Moskva, Kartotsentr-Geodezizdat, 224 p. [in Russian]
- Shustov, 2010 – Shustov, B.M. (2010). On coordinated approach to the problem of asteroid-comet impact hazard. *Cosmic Research.* 48(5): 378-391.
- Shustov, 2019 – Shustov, B.M. (2019). The Role of Science in the Study and Prevention of Space Hazards. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 89(4): 311-324.
- Tsvetkov, 2011 – Tsvetkov, V.Ya. (2011). Principles of measurement of surfaces of extra-terrestrial territories. *International journal of applied and fundamental research.* 10: 14.
- Tsvetkov, 2016 – Tsvetkov, V.Ya. (2016). The Problem of Asteroid-Comet Danger. *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A.* 1 (2): 33-40.
- Tsvetkov, 2017 – Tsvetkov, V.Ya. (2017). Application of Monte Carlo Method for Calculation of the Comets' Area by the Photographic Pictures. *Modeling of Artificial Intelligence.* 4(2): 96-101.
- Tsvetkov, Khlebnikova, 1987 – Tsvetkov, V.Ya., Khlebnikova, T.A. (1987). Issledovanie pryamoi fotogrammetricheskoi zasechki [Research of direct photogrammetric intersection]. *Geodeziya i kartografiya.* 2: 48-51. [in Russian]
- Tsvetkov, 2018 – Tsvetkov, V.Ya. (2018). The Development of the Direction "Comparative Planetology". *Russian Journal of Astrophysical Research. Series A.* 4(1): 34-41.
- Urmaev, 1989 – Urmaev, M.S. (1989). Kosmicheskaya fotogrammetriya [Space photogrammetry]: uchebnyk dlya vuzov. Moskva, Nedra, 279 p. [in Russian]
- Yashkin, 2014 – Yashkin, S.N. (2014). Nebesnaya mekhanika [Celestial mechanics]: uchebnoe posobie. M.: Izd-vo MIIGAiK. [in Russian]

Определения координат точек на поверхности космического тела

Сергей Владимирович Шайтура ^{a, b, c, d, e, *}

^a Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация

^b Международная академия информатизации, Российская Федерация

^c Российская академия космонавтики им. Э.К. Циолковского, Российская Федерация

^d Международная академия наук педагогического образования, Российская Федерация

^e Институт гуманитарных наук, экономики и информационных технологий, Бургас, Болгария

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: swshaytura@gmail.com (С.В. Шайтура)

Аннотация. Статья вводит обобщенное понятие космическое тело. Это понятие включает: планеты, спутники планет, астероиды, кометы, малые небесные тела. Метод использует внутреннюю и внешнюю системы координат. Статья исследует метод и алгоритм определения координат точек на поверхности космического тела. Съемка осуществляется с борта космического аппарата, движущегося мимо космического тела. Траектория космического аппарата считается плоской и не возмущенной. Поворот камеры обеспечивает создание зоны перекрытия для пары фотоснимков и переход из внутренней системы координат к внешней. Определение координат точек на поверхности космического тела осуществляется по фотоснимкам с перекрывающимися зонами наблюдения. Для решения задачи необходимо инерциальное определение координат траектории космического аппарата и поворот камеры на известный угол. Решение прямой фотограмметрической засечки осуществляется под условием равенства масштабов. Допускается некомпланарность векторов, определяющих положение точки на поверхности и космического тела. Метод применим для определения координат точек на поверхности любых космических тел.

Ключевые слова: космическое тело, координаты точек поверхности, орбита, космический аппарат, фотосъемка, прямая засечка.